

DOI: 10.7667/PSPC160859

# 一种基于拖尾电流识别的失灵保护实现

万洛飞<sup>1,2</sup>, 李志坚<sup>1,2</sup>, 宋斌<sup>1,2</sup>, 龙锋<sup>1,2</sup>, 赵瑞辰<sup>1,2</sup>

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 210006; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210006)

**摘要:** 当断路器跳开后, 电流互感器(CT)二次侧产生的拖尾电流延长了失灵电流元件的返回时间, 有可能造成断路器失灵保护误动作。目前工程上多采用增加失灵保护动作延时来躲避拖尾电流影响, 但这会增加断路器真正失灵时失灵保护的動作时间, 偏离了继电保护的快速性特点。基于拖尾电流和非拖尾电流在波形特点上的差异性, 对拖尾电流进行快速有效的识别。一经识别出拖尾电流, 立即闭锁失灵保护, 消除拖尾电流对失灵保护产生的不利影响。利用实时数字仿真系统(RTDS)对基于拖尾电流闭锁的失灵保护进行仿真实验。实验结果表明, 基于拖尾电流闭锁的失灵保护能准确识别断路器跳开后的拖尾电流, 在故障电流条件下不拒动, 在拖尾电流条件下不误动, 动作行为可靠。

**关键词:** 失灵保护; 电流互感器; 拖尾电流; 波形识别; RTDS

## Implement method of breaker failure protection based on subsidence current blocking

WAN Luofei<sup>1,2</sup>, LI Zhijian<sup>1,2</sup>, SONG Bin<sup>1,2</sup>, LONG Feng<sup>1,2</sup>, ZHAO Ruichen<sup>1,2</sup>

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 210006, China;

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 210006, China)

**Abstract:** When the fault current is successfully interrupted by the CB open, it always contains a subsidence current in the secondary side of the current transformer (CT), and this current extends the reset time of the breaker failure current, which may lead to breaker failure protection's maloperation. Now, it used to increase the delay time of breaker failure protection to avoid maloperation. In this way, when the CB is real failure, breaker failure protection will take much more time to open the CB, and this does not meet the fast feature of protection relay. In this paper, based on difference characteristic between subsidence current and other current, it presents a method to identify subsidence current fast. In this method, it effectively avoids breaker failure protection's maloperation by the recognition of subsidence current without increase the time delay. In the last, the RTDS is used to test the breaker failure protection integrated with the subsidence current blocking function. The result shows that the improved breaker failure protection takes good operation behavior in both fault current condition and subsidence current condition. No maloperation on the subsidence current condition, no non-action on the fault current condition.

**Key words:** breaker failure protection; current transformer; subsidence current; current wave identification; RTDS

## 0 引言

断路器失灵保护是指电力系统发生故障时, 在故障元件保护发出跳令而断路器本体拒动的条件下, 能够快速跳开相邻断路器来切除故障的一种保护。在 220 kV 及以上的电力系统中, 均配置有断路器失灵保护<sup>[1]</sup>。随着电力系统结构的日益复杂, 为保证电力系统运行的稳定性, 通常失灵保护动作延时较短且返回门槛较低。当系统发生故障, 故障元件保护正确动作发出跳令跳开断路器开关, 切除故

障电气一次部分。但此时, 由于拖尾电流的存在, 电流互感器(CT)二次绕组仍会存在衰减的非周期电流分量。受故障切除时电流大小和 CT 二次回路时间常数的影响, 该拖尾电流幅值可能需经过十几个周波才会衰减为 0, 这将导致断路器失灵保护的电流判据返回过慢, 可能引起失灵保护误动作, 扩大停电范围<sup>[2-3]</sup>。目前对拖尾电流的识别多采用的是波形过零点判断。但是故障电流中的非周期偏置电流会造成的波形过零点消失, 而拖尾电流出现后, 由于保护装置 CT 的传变误差, 拖尾电流也出现过零

的现象,从而导致过零点判据失效,且过零点识别需要一个周波时间,识别过程较长<sup>[4]</sup>。目前,对于失灵保护的防误,多是采用增加失灵保护的動作延时或是抬高動作門槛来躲避拖尾电流的影响<sup>[5]</sup>,这必然会影响失灵保护的快速性和灵敏性。

## 1 拖尾电流产生与特征分析

电流互感器(CT)作为一种特殊的变压器,其特性与一般变压器有相似之处。其一、二次侧绕组绕在同一个磁路闭合的铁芯上,依据电磁感应原理,实现一次侧电流到二次侧电流的变换。

### 1.1 拖尾电流的产生

断路器闭合时,电力系统交流电从 CT 一次侧绕组流入,交变的电流在铁芯中产生交变的磁通,在 CT 二次侧绕组产生感应电流<sup>[6]</sup>。当断路器跳开,CT 一次侧电流突变为 0。由于铁芯中的磁通不能突变,CT 二次侧将会出现一个电流来维持断路器开关打开时的磁通量。随着铁芯磁能的衰减,该电流也将呈现出单方向衰减的特性,这个衰减的电流称作拖尾电流。

### 1.2 拖尾电流的特征

CT 的工作原理近似于变压器,做出 CT 的等效电路<sup>[4]</sup>,如图 1 所示。

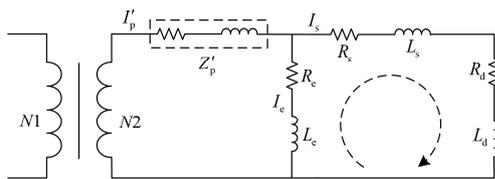


图 1 电流互感器等效电路

Fig. 1 CT equivalent circuit

其中,  $N_1$  和  $N_2$  代表一、二次绕组匝数,  $I'_p$  和  $Z'_p$  代表折算到二次侧的一次电流和阻抗,  $I_s$  代表二次电流,  $R_s$ 、 $L_s$  组成二次绕组阻抗,  $I_e$  代表励磁电流,  $R_e$ 、 $L_e$  组成励磁阻抗,  $R_d$ 、 $L_d$  组成负荷阻抗。

由图 1 可知,当断路器跳开时,一次侧电流为零,二次侧电流将在 RL 回路中衰减。其衰减的特性符合 RL 电路的零输入响应特性<sup>[7]</sup>。根据 RL 电路的零输入响应方程可计算出拖尾电流的数学表达式<sup>[4]</sup>为

$$i(t) = I_0 \times e^{-(t/\tau)} \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为 CT 二次侧时间常数,其值为 CT 二次回路总电感与总电阻的比值;  $I_0$  为拖尾电流的初始值。

由式(1)可知,拖尾电流呈现出指数衰减的特性,在衰减期内,电流方向不会改变,呈现直流的特性。由于指数函数在其作用域内单调性的特点,

因此拖尾电流在整个衰减期内,其波形的增减性不会发生改变。

## 2 拖尾电流对失灵保护的影响

当发生断路器失灵故障时,为保证系统的稳定运行,要求失灵保护具有较短的動作延时。另一方面,为确保断路器开关能够可靠跳开,失灵保护的电流返回門槛通常设定较低,一般在  $0.06 I_n$  左右<sup>[2]</sup>。系统发生故障时,故障电流可能达到  $20 I_n$ 。若断路器跳开时不存在拖尾电流,失灵电流一般经过 20 ms 左右的时间可靠返回,失灵保护启动的时间不会超过整定的失灵保护動作延时,失灵保护基本不会出现误動作。但是,若断路器跳开,CT 二次侧产生拖尾电流,且拖尾电流的初始值较大、CT 二次侧时间常数较大时,缓慢衰减的拖尾电流的幅值可能在失灵保护的動作延时到时仍然大于失灵电流的返回門槛,失灵电流条件一直满足,从而导致失灵保护误動作。

不论从理论分析,还是从相关的文献查阅<sup>[5]</sup>,都可以证明拖尾电流是客观存在的。目前工程中为减小拖尾电流引起失灵保护误动的可能性,通常做法是抬高失灵电流動作門槛或是增加失灵動作延时<sup>[7]</sup>。但是抬高動作門槛,将会降低失灵保护的灵敏度,在某些轻载的条件下,导致失灵保护存在拒动可能;增加失灵動作延时,将会影响到系统的稳定运行,甚至导致系统的瓦解。

在保证失灵保护快速性和灵敏性的前提下,为消除拖尾电流对失灵保护造成的负面影响,本文提出了一种基于拖尾电流闭锁的失灵保护。通过对电流波形进行有效的辨识,快速识别拖尾电流闭锁失灵保护,消除误动风险。

## 3 失灵保护逻辑的改进

本文提出的失灵保护方案是基于对拖尾电流的快速有效识别,从电流波形特点上挖掘拖尾电流与非拖尾电流之间的显著差异,快速完成识别过程,一经识别出拖尾电流,立即闭锁失灵保护。

### 3.1 拖尾电流波形特点分析

根据第一章分析,断路器开关跳开后,在 CT 二次侧所形成的拖尾电流呈现出以指数形式衰减的直流分量特点。对拖尾电流的函数表达式进行求导,结果如式(2)。

$$i(t)' = -(I_0/\tau) \times e^{-(t/\tau)} \quad (2)$$

通过对式(1)和式(2)的分析,从以下两方面总结拖尾电流特点。

(1) 拖尾电流波形增减性

若断路器跳开瞬间的电流为正, 即拖尾电流初始值为正, 其导数值恒为负。在其衰减期内, 拖尾电流波形呈现单调递减特点, 该波形各采样点均为正, 且在数值上依次减小, 最终为 0。

若断路器跳开瞬间的电流为负, 即拖尾电流初始值为负, 其导数值恒为正。在其衰减期内, 拖尾电流波形呈现单调递增特点, 该波形各采样点均为负, 且在数值上依次增大, 最终为 0。

(2) 拖尾电流滤直流幅值

拖尾电流的呈现衰减性直流的特点, 其波形中直流分量含量极高。对其波形做差分运算, 对其进行直流滤波, 通过对差分后波形计算的半波积分值分析可知, 其值呈现衰减速度快的特点。

3.2 拖尾电流与非拖尾电流差异性分析

电力系统负荷电流为正弦波特特性, 呈现出严格的周期性特点。其波形的增减特性以 1/2 周波时间为周期, 增减性交替变化。

故障电流波形由周期性的交流分量和衰减的非周分量组成<sup>[8]</sup>。衰减的非周分量仅使得电流波形对时间轴的对称性发生改变, 但并不能改变故障电流波形增减性交替变化的特点。

CT 饱和时, CT 二次侧电流波形发生畸变。受饱和和影响, 电流波形较负荷电流或是故障电流而言, 会提前进入递减区域。但随着一次侧电流的过零出现, CT 出现短暂的退饱和, 此时 CT 二次侧电流也会出现短暂的递增特性<sup>[9]</sup>。因此, CT 饱和影响了二次侧电流波形增减特性各自出现的时间, 不改变波形增减性交替出现的特征。

由以上分析可知, 负荷电流和故障电流不论是否受到 CT 饱和的影响, 在其电流的生存期内, 波形的增减性总是交替变化的。而拖尾电流在其存在期内, 其波形呈现严格单调性的特点, 波形的增减性不会发生改变。

以故障电流为例, 结合电流采样值的正负性, 在一个周波时间内, 分析其与拖尾电流波形存在一致性的区间, 如图 2 所示。

拖尾电流 1 代表其电流值为正, 波形呈单调递减的特性; 拖尾电流 2 代表电流值为负, 波形呈单调递增的特性。通过对图 4 分析可知, 在一个周波内, 以峰值点和过零点为边界组成的四个区间, 处在递减的 1/2 周波区间内, 故障电流只有采样值为正区间①满足拖尾电流的特点。同理, 处在递增的 1/2 周波区间内, 只有区间③满足拖尾电流的特点。换言之, 故障电流在 1/2 周波内, 无法完全满足拖尾电流的特点。因此通过分析电流波形在连续 1/2

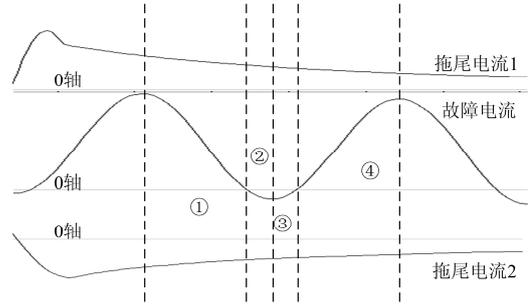


图 2 故障电流和拖尾电流波形增减性差异性  
Fig. 2 Different monotonicity between fault current and subsidence current

周波内采样值的正负和波形的增减性成为正确区分拖尾电流和故障电流的一种手段。

此外, 故障电流中的稳态正弦分量电流, 使得故障差分电流的半波积分值不同于拖尾电流的快速衰减特点。因此, 以差分电流的半波积分值作为电流把关条件, 保证在故障电流初期偏置直流分量较大时, 故障电流波形整体处于 0 轴上方的条件下<sup>[10]</sup>, 利用 1/2 周波时间对拖尾电流的识别不会出现误判情况, 提高识别的准确性。

3.3 拖尾电流的识别

通过上述分析, 在 1/2 周波时间内, 通过波形增减性的特点和差分电流的半波积分值可对拖尾电流进行有效识别。为简化识别逻辑, 事先对采样电流波形进行取绝对值处理。处理后, 电流采样值均为正, 因此仅需要识别各个电流采样值的连续递减区间即可。本方案中, 以失灵保护元件的启动作为进入拖尾电流识别的条件, 拖尾电流采用分相识别原则, 以 A 相为例, 给出识别判据如图 3 所示。

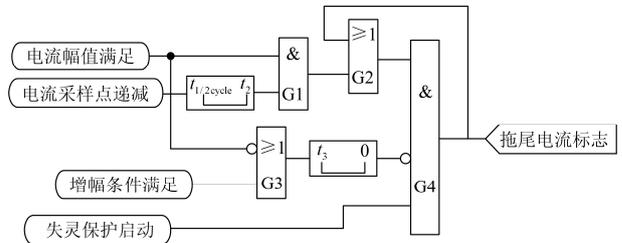


图 3 拖尾电流识别逻辑

Fig. 3 Subsidence current recognition logic

图 3 所示逻辑中, 经差分后的电流采样点的半波积分值小于门槛 P 即认为电流幅值满足, 其中, 门槛 P 以躲过最大负荷电流整定。若经绝对值处理后的当前电流采样值不大于经同样处理的上一点电流采样值, 即认为电流采样点递减条件满足; 若经绝对值处理后的当前电流采样值大于经同样处理的

上一点电流采样值，且增幅超过内部门槛  $k$ ，即认为增幅条件满足。门槛  $k$  的取值应能保证故障时增幅条件可靠开放，本文中， $k$  值取  $0.04I_n$ 。当进入拖尾电流识别逻辑且已识别出当前电流为拖尾电流，可以依靠电流幅值和采样点增幅条件，经延时后复归拖尾电流标志。

### 3.4 失灵保护逻辑改进

#### (1) 失灵保护判据优化

针对分相失灵保护和三相失灵保护这两种失灵保护类型，分别引入拖尾电流闭锁标志。改进后的判据如下，其中图 4(a)代表单相失灵逻辑，图 4(b)代表三相失灵逻辑。

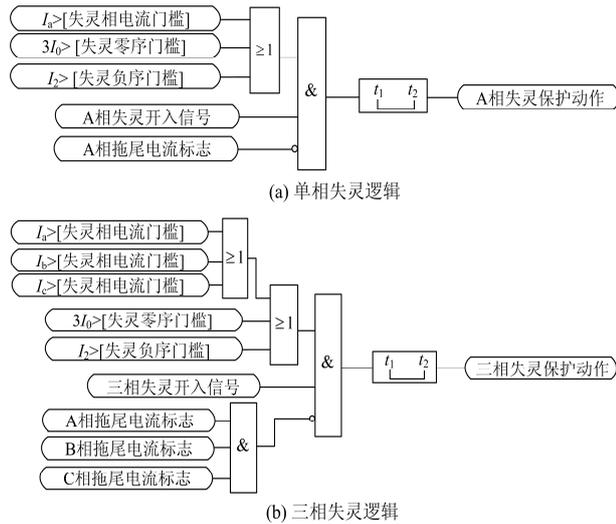


图 4 改进后的失灵动作逻辑

Fig. 4 Improved breaker failure protection logic

#### (2) 失灵保护返回时间优化

失灵保护启动后，一般是以失灵电流元件检测到无流作为返回条件，确保断路器真正的跳开。若不存在拖尾电流问题时，失灵电流元件的返回时间不大于 20 ms。但是，若电流存在拖尾，采用差分滤波，失灵电流元件能在 40 ms 内返回，未采用差分滤波，失灵电流元件返回时间可达 200 ms<sup>[11]</sup>。

采用本文的增加了拖尾电流闭锁的失灵保护，在拖尾电流条件下，利用 1/2 周波时间就能对其准确识别。一经识别出拖尾电流，失灵保护立即返回，有效地缩短了存在电流拖尾时失灵保护的返回时间，有利于失灵动作延时的整定。

## 4 基于 RTDS 改进后的失灵保护数模实验

在保护装置中集成带有拖尾电流闭锁的失灵保护功能，基于 RTDS 数模系统进行仿真实验<sup>[12-17]</sup>。其中 CT 二次时间常数为 60 ms，断路器动作时间

100 ms<sup>[18]</sup>。保护装置失灵动作延时 160 ms。失灵保护相电流门槛  $0.06 I_n$ ，装置 CT 二次额定值  $I_n$  为 5 A。通过 RTDS 仿真系统模拟如下故障，对改进后的失灵保护动作行为进行验证，仿真实验单线图如图 5 所示。

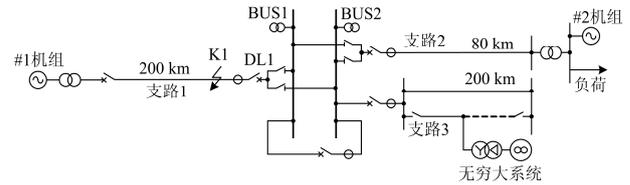


图 5 测试系统单线图

Fig. 5 Single line diagram of testing system

实验模拟 K1 处单相接地故障，并分别在断路器 DL1 正确跳开和失灵的条件下进行试验，3 次实验的装置录波如图 6(a)、图 6(b)、图 6(c)所示。

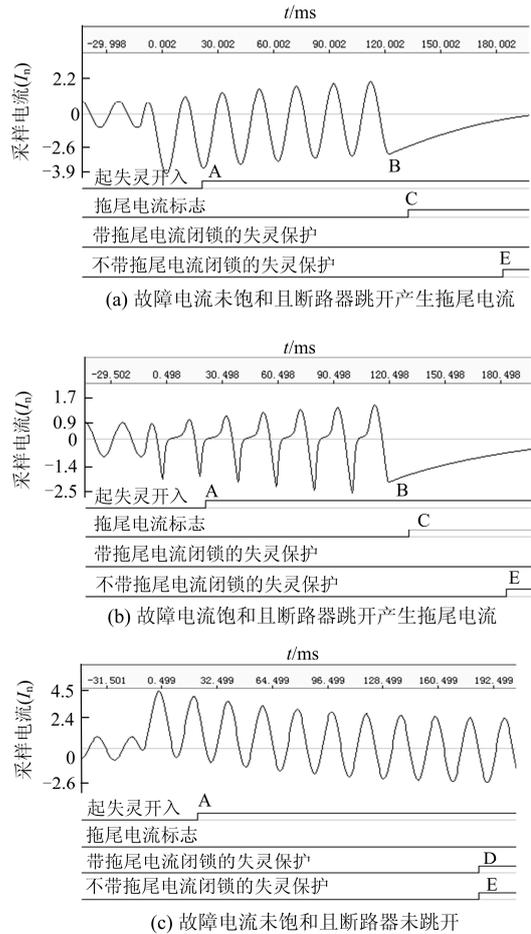


图 6 RTDS 实验装置录波

Fig. 6 Device waveform recorder of RTDS test

图 6 中，A 代表起失灵开入变位时刻，B 代表断路器开关打开时刻，C 代表识别出拖尾电流时刻，D 代表改进后失灵保护动作时刻，E 代表改进前失

灵保护动作时刻。3 次试验各标志变位时刻如表 1 所示。

表 1 实验中各标志变位时刻  
Table 1 Time of each flag change

动作时刻	A	B	C	D	E
实验 1	23 ms	123 ms	133 ms	无	183 ms
实验 2	23 ms	123 ms	133 ms	无	183 ms
实验 3	23 ms	无	无	183 ms	183 ms

如图 6(a)所示, A 时刻, 失灵保护启动, 断路器开关在 B 时刻打开, 产生拖尾电流, 其初始值为  $-2.6I_n$ 。装置经过 10 ms 延时准确识别出拖尾电流, 置拖尾电流标志为 1。在失灵动作延时到的时刻, 拖尾电流幅值衰减为  $0.123 I_n$ 。改进后的失灵保护在拖尾条件下没有误动, 改进前的失灵保护受拖尾电流影响, 延时到时失灵电流条件仍满足, 失灵保护发生误动。

如图 6(b)所示, A 时刻, 失灵保护启动, 断路器开关在 B 时刻打开, 产生拖尾电流, 其初始值为  $-2.2I_n$ 。装置经过 10 ms 延时准确识别出拖尾电流, 置拖尾电流标志为 1。在断路器开关打开前的饱和电流条件下, 拖尾电流不存在误识别情况。在失灵动作延时到的时刻, 拖尾电流幅值衰减为  $0.074 I_n$ , 改进后的失灵保护在拖尾条件下没有误动。改进前的失灵保护受拖尾电流影响, 延时到时失灵电流条件仍满足, 失灵保护发生误动。

如图 6(c)所示, A 时刻, 失灵保护启动。断路器开关确实失灵, 电流为故障电流, 未出现电流拖尾。装置拖尾电流识别判据可靠不误识别。在失灵动作延时到的时刻, 故障电流幅值  $1.73 I_n$ 。改进后带有拖尾电流闭锁的失灵保护可靠动作。

通过以上 3 种不同的实验可以看出, 本文提出的识别拖尾电流的方法, 实现了用 1/2 周波的时间对拖尾电流的准确识别。该识别方法不受 CT 饱和的影响, 在 CT 饱和的情况下能保证识别的准确性。改进后的失灵保护, 在出现 CT 拖尾电流的条件下, 可靠不误动, 在故障电流时可靠不拒动。相比于改进前的失灵保护, 在相同失灵动作门槛时, 依靠对拖尾电流的识别提高了相同动作延时条件下的动作可靠性。

## 5 结语

本文对拖尾电流造成失灵保护误动进行分析, 提出了一种基于拖尾电流闭锁的失灵保护方案。该方案中对拖尾电流的识别方法简单易行效率高。出现拖尾电流时, 仅需 1/2 周波的延时就能对其准确

识别, 识别速度快; 在没有拖尾电流时, 可靠不误识别。一经识别出拖尾电流, 立即闭锁失灵保护。通过 RTDS 数模仿真系统进行实验验证, 结果表明对改进后的失灵保护逻辑, 在真正断路器失灵时不拒动, 在断路器断开后产生拖尾电流时不误动, 动作的可靠性得到提高。采用本方案后, 在保证失灵保护动作灵敏性和快速性同时, 消除了拖尾电流对失灵保护的负面影响, 提高了动作可靠性, 具有一定的工程应用价值。

## 参考文献

- [1] 黄继东, 韩海伦, 唐慧, 等. 断路器失灵时站内保护解决方案综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 146-150.  
HUANG Jidong, HAN Hailun, TANG Hui, et al. Summary of system resolution aiming at breaker failure[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 146-150.
- [2] 张洪, 常风然. 高压电网的断路器失灵保护[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 79-81.  
ZHANG Hong, CHANG Fengran. Breaker failure protection in high-voltage power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(5): 79-81.
- [3] 国家电力调度通信中心. 国家电网公司继电保护培训教材(下册)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 457-467.
- [4] 李志勇, 傅润炜, 王峥夏, 等. 电流互感器拖尾对断路器失灵保护影响的仿真研究[J]. 河南科技, 2014(5): 119-121.  
LI Zhiyong, FU Runwei, WANG Zhengxia, et al. The simulation study on the impact on breaker failure protection due to subsidence current[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2014(5): 119-121.
- [5] 高鹏, 高明, 吴成忠. 浅析电流互感器拖尾电流对失灵保护的影响[J]. 华中电力, 2012, 25(1): 7-13.  
GAO Peng, GAO Ming, WU Chengzhong. Analysis on the impact on breaker failure protection based on the CT subsidence current[J]. Central China Electric Power, 2012, 25(1): 7-13.
- [6] 袁季修, 盛和乐, 吴聚业. 保护用电流互感器应用指南[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 8-17.
- [7] 姜自强, 刘建勇. 南阳特高压断路器失灵保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 117-122.  
JIANG Ziqiang, LIU Jianyong. The study on high voltage breaker failure protection in Nanyang[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 117-122.
- [8] 戚宣威, 尹项根, 李甘, 等. 一种电流互感器仿真平台

- 构建方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 69-76.
- QI Xuanwei, YIN Xianggen, LI Gan, et al. A construction method for the simulation platform for the analysis of the current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 69-76.
- [9] 吴崇昊, 陆于平, 刘小宝. 基于电流互感器线性传变区检测的母线采样值差动保护[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 70-74.
- WU Chonghao, LU Yuping, LIU Xiaobao. Busbar sampled value differential protection based on liner transfer section checking of TA[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 70-74.
- [10] 吴娅妮, 蒋卫平, 王华伟, 等. 500 kV 交流线路断路器电流延时过零现象研究[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 195-200.
- WU Yani, JIANG Weiping, WANG Huawei, et al. Research on zero offset of short circuit current occurred in circuit breaker for 500 kV AC transmission line[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 195-200.
- [11] 余江, 周红阳, 陈晓晖, 等. 500 kV 断路器失灵保护优化[J]. 南方电网技术, 2014, 8(2): 55-59.
- YU Jiang, ZHOU Hongyang, CHEN Zhaohui, et al. Research of improvement of 500 kV breaker failure protection[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(2): 55-59.
- [12] 范宏, 朱牧之, 沈冰, 等. 线路保护实时仿真自动测试平台设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 123-129.
- FAN Hong, ZHU Muzhi, SHEN Bing, et al. Research on automatic testing system of line protection based on real time simulation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 123-129.
- [13] 欧开健, 张树卿, 童陆园, 等. 基于并行计算机/RTDS 的混合实时仿真不对称故障接口交互与实现[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 178-185.
- OU Kaijian, ZHANG Shuqing, TONG Luyuan, et al. Interface method and implementation for asymmetric fault simulation on parallel computer/RTDS-based hybrid simulator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 178-185.
- [14] 卫鹏, 刘建坤, 周前, 等. 基于 RTDS 特高压直流控保仿真平台的锦苏特高压直流建模及仿真[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 134-139.
- WEI Peng, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. Modeling and simulation of UHVDC transmission system from Jinping to Sunan based on the RTDS smulation platform of UHVDC control and protection[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 134-139.
- [15] 卫鹏, 刘建坤, 周前, 等. 一起复杂交流故障导致的锦苏直流换相失败的研究[J]. 高压电器, 2016, 52(5): 96-100.
- WEI Peng, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. Research on commutation failure of Jin-Su DC transmission project caused by a complex AC fault[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(5): 96-100.
- [16] 尹俊, 毕天姝, 薛安成, 等. 计及低穿控制的混合型风电场短路电流特性与故障分析方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 99-110.
- YIN Jun, BI Tianshu, XUE Ancheng, et al. Study on short-circuit current and fault analysis method of hybrid wind farm with low voltage ride-through control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 99-110.
- [17] 杨洋, 肖湘宁, 陶顺, 等. 多端口电磁-机电暂态混合实时仿真接口技术与应用[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 231-240.
- YANG Yang, XIAO Xiangning, TAO Shun, et al. Multi-port interface technique and application of electromagnetic and electromechanical transient hybrid real-time simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(4): 231-240.
- [18] 余江, 周红阳, 陈晓晖, 等. 计及系统稳定需求的 500 kV 断路器失灵及死区保护优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 142-146.
- YU Jiang, ZHOU Hongyang, CHEN Xiaohui, et al. Research of improvement of 500 kV breaker failure protection and deadzone protection based on power system stability requirements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 142-146.

收稿日期: 2016-06-13; 修回日期: 2016-08-02

作者简介:

万洛飞(1984—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: wanluofei@sgepri.sgcc.com.cn

李志坚(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: lizhijian@sgepri.sgcc.com.cn

宋斌(1968—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统保护与控制. E-mail: songbin@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)